

**П. Ясній, докт. техн. наук; В. Гладь, канд. техн. наук;
С. Федак, канд. техн. наук; І. Шульган**

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНОЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ ПОВЗУЧОСТІ СПЛАВУ АМг6

За допомогою методу скінченних елементів досліджено вплив статичного та циклічного навантажування на напружено-деформований стан при повзучості алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6 з урахуванням гетерогенної структури матеріалу. Встановлено основні закономірності деформування та пошкоджуваності матеріалу за різних значень максимальних напружень. Виявлено зменшення впливу циклічної складової на руйнування включень та деформацію повзучості зі зростанням максимального рівня напружень. Проведено порівняння розрахункових даних деформації повзучості з експериментальними.

P. Yasniy, V. Hlado, S. Fedak, I. Shulhan

MODELING OF Al-6%Mg ALLOY CREEP AT STATIC AND DYNAMIC LOADING

The influence of static and oscillating loading on strain-stress state of Al-6%Mg alloy creep was studied using the finite element method and taking into consideration the heterogeneous structure of the material. The main regularities of deformation and damage of the material at varied maximum tension level were stated. There was found the reducing of cyclic component influence on inclusions fracture and creep deformation during maximum tension level increase. Design data were compared with the experimental ones.

Повзучість матеріалів істотно залежить від характеру прикладеного навантаження. Зокрема, наявність циклічної складової навантаження суттєво впливає як на деформацію матеріалів, так і на мікроструктурні зміни при повзучості [1].

При циклічній повзучості відбувається багаторазова зміна навантаження від мінімального до максимального значення. Цей процес супроводжується збільшенням швидкості пластичної деформації матеріалу [2]. Накопичення пластичної деформації в умовах повзучості залежить від режиму навантаження, при цьому циклічна складова зумовлює помітну різницю в довговічності порівняно із статичним навантаженням. Довговічність матеріалу під дією циклічного навантаження зменшується [2, 3].

Відома значна кількість праць, у яких розглядаються методики прогнозування динамічної повзучості [4-6]. Работновим Ю.Н. була запропонована методика, яка враховує вплив циклічної складової на деформацію динамічної повзучості за умови відсутності рекристалізації і фазових перетворень у матеріалі [4]. Згідно з його гіпотезою, динамічна повзучість відбувається так само, як і статична повзучість при напруженні, більшому за середнє напруження циклу. Для опису динамічної повзучості також було запропоновано рівняння, що враховує ізотропне зміцнення матеріалу [5]. У праці [6] було запропоновано рівняння для прогнозування динамічної повзучості з врахуванням коефіцієнту, який залежить від рівня максимальних напружень та асиметрії циклу.

Реальні конструкційні матеріали - неізотропні за своїми властивостями і мають неоднорідну внутрішню структуру. Вони представляють собою гетерогенні багатокомпонентні сплави з складною внутрішньою будовою, повзучість яких залежить від взаємодії складових, що утворюють конкретний матеріал. Моделювання повзучості металічних матеріалів з врахуванням наявності включень проведено в праці [7]. Виявлено істотне зменшення повзучості за наявності в матеріалі включень. Повзучість алюмінієво-магнієвого композиту за різних температур досліджено в праці [8].

Дослідження методом скінченних елементів першої ділянки повзучості алюмінієвого композиту наведено у праці [9].

При повзучості гетерогенного сплаву в компонентах (включеннях або матриці) може настати граничний стан, внаслідок чого компоненти починають руйнуватися, що викликає перерозподіл напружень і деформацій у матеріалі. Руйнування крихких включень виявлено при деформуванні алюмінієвого сплаву АМг6 [10]. Оскільки наявність гетерогенної структури та мікроструктурні зміни в матеріалі, такі як руйнування включень, мають значний вплив на кінетику пластичної деформації, виникла необхідність дослідити величину цього впливу методом скінченних елементів в умовах статичної та динамічної повзучості з урахуванням структурної неоднорідності матеріалу.

Стаття присвячена дослідженню методом скінченних елементів впливу руйнування крихких включень на статичну і динамічну повзучість алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6.

Методика дослідження

З використанням методу скінченних елементів (МСЕ) проводили моделювання статичної та динамічної повзучості гетерогенного матеріалу на прикладі алюмінієвого сплаву АМг6. У якості розрахункової використовували модель, що описана в праці [11]. Розрахункова модель має вигляд квадрата (зі стороною $1,842 \times 10^{-5}$ м) і складається з пластичної матриці і 100 абсолютно пружних включень (рис. 1). Розподіл включень згідно з їх розміром (коефіцієнтом форми) базується на основі проведених мікроструктурних досліджень [12]. Координати розміщення включень всередині моделі задавали згідно з двовимірним нормальним розподілом.

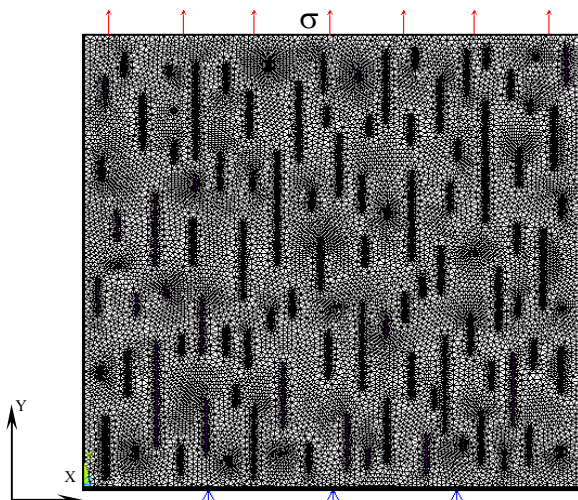
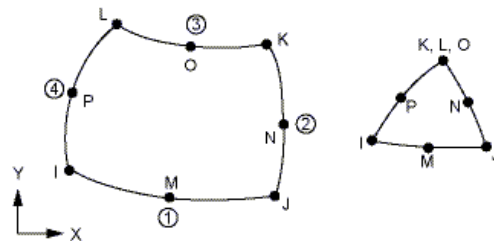


Рисунок 1 – Скінченноелементна модель матеріалу АМг6 з включеннями



а

б

Рисунок 2- Геометрія елемента plane 183:
а – чотирикутна форма елемента;
б – трикутна форма елемента

Скінченноелементна сітка для даної моделі була створена за допомогою двовимірного елемента plane 183 (рис.2) і налічує 115731 елемент. Елемент має властивість квадратичного представлення переміщень і використовується при моделюванні з нерегулярною сіткою скінченних елементів. Його визначають вісім вузлів, які мають два ступені вільності в кожному вузлі. Елемент має властивості пластичності, гіперпружності, повзучості, збільшення жорсткості при наявності навантажень, значних переміщень і деформацій. Елемент може набувати чотирикутної (рис.2а) та трикутної (рис. 2б) форм.

Навантаження прикладали до верхньої лінії розрахункової моделі. Нижню лінію (основу моделі) фіксували і обмежували її переміщення у вертикальному напрямку (вздовж осі Y).

Моделювання проводили в умовах плоского деформованого (plane strain) стану. Під час проведення розрахунків були активовані опції повзучості та руйнування структурних складових моделі при досягненні у них критичних напружень. Повзучість матеріалу описували згідно з теорією старіння:

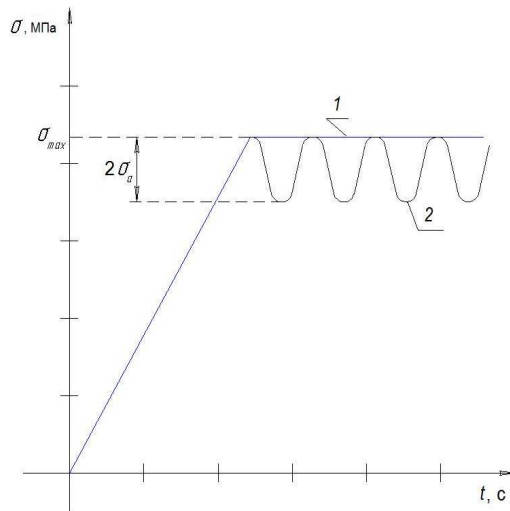


Рисунок 3 - Схема навантажування при випробуваннях сплаву АМг6 на статичну (1) та динамічну (2) повзучість

$$\varepsilon = \frac{C_1 \sigma_{\max}^{C_2} t^{C_3+1} e^{-\frac{C_4}{t}}}{C_3 + 1},$$

де C_1 , C_2 , C_3 , C_4 - константи, що характеризують повзучість модельованого матеріалу, σ_{\max} - максимальне напруження за динамічної повзучості, t - час.

Схеми навантаження (рис. 3) моделі в умовах статичної і динамічної повзучості аналогічні експериментальним [13]. Повзучість сплаву АМг6 моделювали за постійного навантаження $\sigma_{ст}$ (крива 1) та з накладанням високочастотної ($f = 25$ Гц) низькоамплітудної ($\sigma_a = \pm 25$ МПа) складової (крива 2). Значення максимального напруження за динамічної повзучості σ_{\max} забезпечували за умови $\sigma_{ст} = \sigma_{\max}$.

Розрахунки проводили при навантаженнях $\sigma_{ст} = \sigma_{\max} = 229, 300, 340, 355, 360$ МПа.

Результати розрахунку та їх обговорення

Процес повзучості відбувається після того, як матеріал деформувався за одновісного розтягу до $\sigma_{ст}$ (σ_{\max}). Попередній розтяг супроводжується розтріскуванням включень [14]. При різних рівнях $\sigma_{ст}$ (σ_{\max}) ще до початку повзучості матеріал містить різну кількість розтріснутих включень.

Виявлено, що повзучість при статичному та циклічному навантаженні супроводжується руйнуванням включень. За динамічної повзучості високочастотна складова навантаження забезпечує накопичення більших значень напружень на включеннях, порівняно з відповідним рівнем статичного навантаження, що збільшує кількість зруйнованих включень. Як видно з рис. 4, в умовах статичного навантажування зруйнувалось одне включення (а), а в умовах циклічного зруйнувалось три включення (б) за однакового часу та максимальних напружень повзучості.

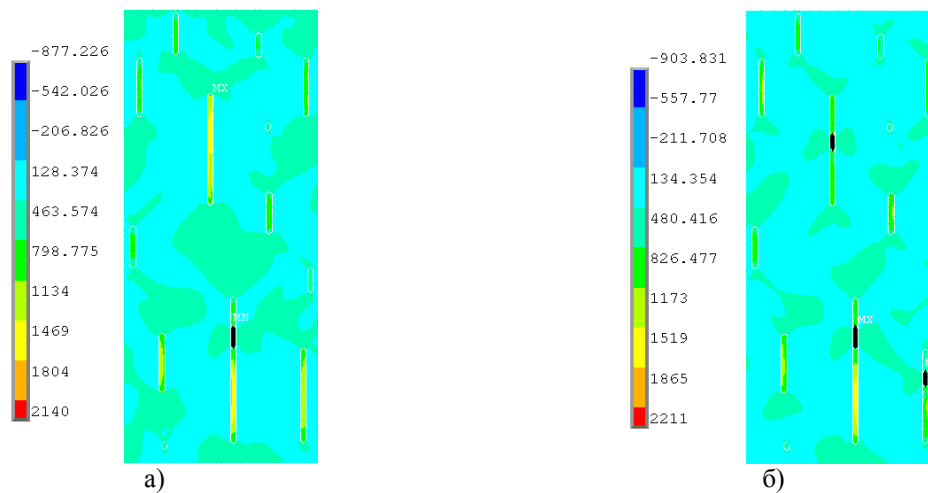


Рисунок 4 - Фрагмент розрахункової моделі зі зруйнованими включеннями при $\sigma_{cm} = \sigma_{max} = 300$ МПа та $t = 60$ с: а – статичне навантаження, б – циклічне навантаження із частотою $f = 25$ Гц

Руйнування включень веде до перерозподілу напружень і деформацій у моделі та до інтенсифікації деформації повзучості при циклічному навантажуванні. Проведено порівняльний аналіз отриманих розрахункових даних з експериментальними [13] і виявлено задовільну відповідність між ними (рис. 5). Максимальна похибка між результатами, отриманими методом скінченних елементів, та експериментальними даними, не перевищує 12%.

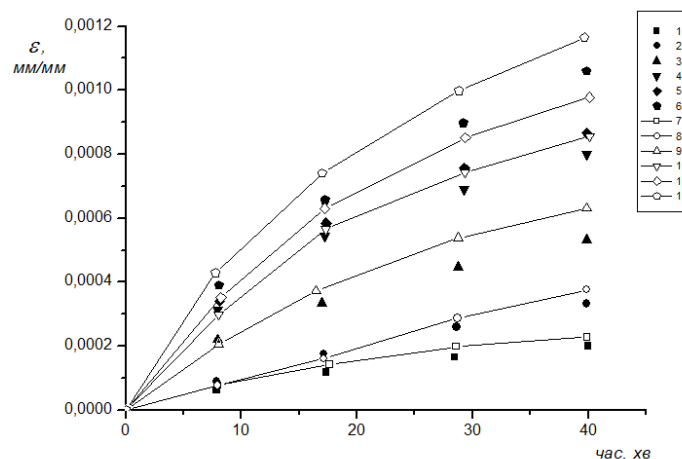


Рисунок 5 - Діаграми повзучості сплаву АМg6, отримані експериментально (1-6), та методом скінченних елементів (7-12): за статичного навантаження $\sigma_{cm} = 300$ МПа (1,7); $\sigma_{cm} = 340$ МПа (3,9); $\sigma_{cm} = 355$ МПа (5,11); за динамічного навантаження $\sigma_{max} = 300$ МПа (2,8); $\sigma_{max} = 340$ МПа (4,10); $\sigma_{max} = 355$ МПа (6,12)

При динамічній повзучості накопичення пластичних деформацій більше ніж при статичній за однакового рівня максимального навантаження. Це можна пояснити інтенсивним динамічним перерозподілом напружень та деформацій під час циклічного навантажування і відповідним збільшенням рівня максимального напруження на включенні і в матеріалі матриці. За рахунок збільшення рівня локальних напружень у розрахунковій моделі в умовах динамічної повзучості швидше досягається граничний стан у включеннях і матриці. Рівень пошкоджуваності матеріалу в цілому зростає, і, відповідно, загальна деформація повзучості істотно збільшується порівняно зі статичним навантажуванням.

Мінімальне напруження повзучості, при якому починається руйнування включень модельного матеріалу, складає $\sigma^* = 229$ МПа [12]. Необхідно зауважити, що

відносна кількість зруйнованих включень в умовах динамічної повзучості порівняно з статичною за вказаного рівня напружень σ^* максимальна. При збільшенні напруження повзучості різниця у відносній кількості зруйнованих включень в умовах динамічної і статичної повзучості буде зменшуватись.

Для аналізу впливу рівня навантаження на відношення деформацій за динамічної і статичної повзучості $\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{ст}}}$ використовували нормоване максимальне напруження $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_B}$ (рис. 6). Параметр $\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{ст}}}$ характеризує відношення максимальної деформації в умовах динамічної повзучості до деформації при постійному рівні напружень $\sigma_{\text{ст}}$ за час $t = 40$ хв (I ділянка кривої повзучості).

Ділянка від $\frac{\sigma^*}{\sigma_B}$ до 1 на рис. 6 може бути описана степеневою залежністю:

$$\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{ст}}} = 2,043 \cdot \sqrt{1 - \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_B}} + 1 \quad (1)$$

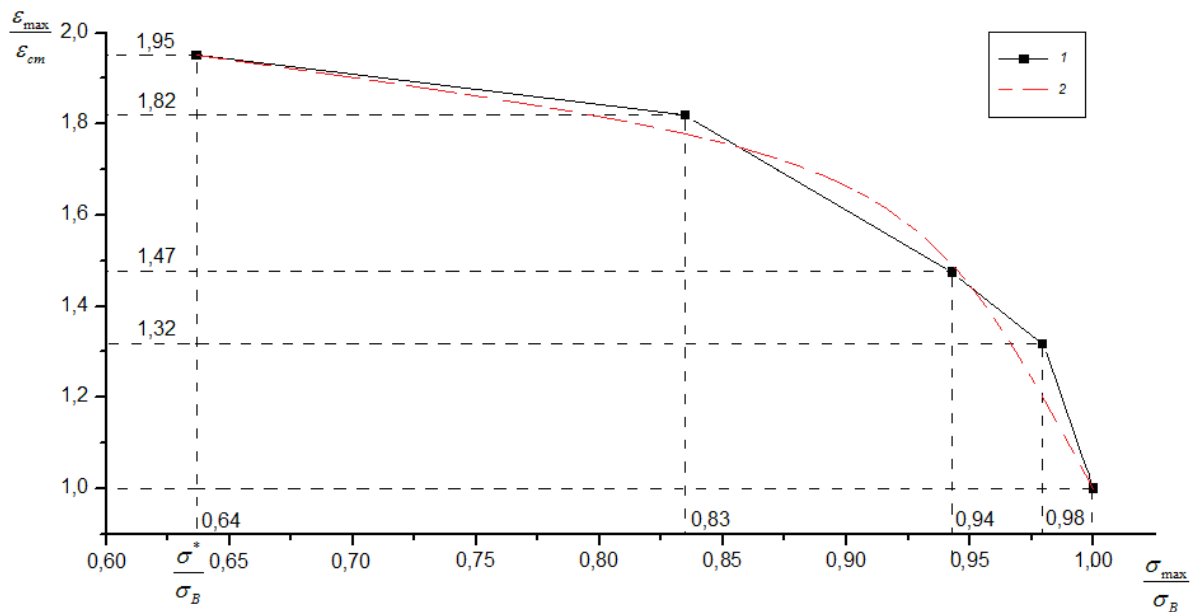


Рисунок 6 - Залежність відносної деформації динамічної повзучості в сплаві АМг6 від нормованих

максимальних напружень в циклі $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_B}$:

1- розрахункові дані; 2 - апроксимація за допомогою залежності (1)

Відповідно, зі зростанням максимального рівня напружень за однакових параметрів циклічного навантажування (частоти та амплітуди) вплив циклічної складової на деформацію повзучості сплаву АМг6 зменшується. Як видно з рис. 6, мінімальний вплив циклічної складової досягається при $\sigma_{\max} = \sigma_B$.

Висновки

1. Методом скінченних елементів досліджено вплив параметрів гетерогенної структури матеріалу та руйнування її складових на повзучість і динамічну повзучість алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6.
2. Виявлено, що низькоамплітудна циклічна складова навантаження збільшує кількість зруйнованих включень та деформацію повзучості порівняно з статичним навантажуванням.

3. Виявлено, що вплив циклічної складової на руйнування включень та деформацію повзучості зменшується зі збільшенням максимального напруження.
4. Запропонована скінченноелементна модель задовільно описує процес повзучості та динамічної повзучості сплаву АМг6. Однак у різних конструкційних матеріалах гетерогенна структура суттєво відрізняється. Тому актуальним залишається питання дослідження впливу зміни форми, кількості, розміщення, розмірів та механічних характеристик структурних складових матеріалу на його поведінку в умовах експлуатації.

Література

1. Трощенко В.Т., Лебедев А.А., Стрижало В.А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. – К.: Логос, 2000. – 571 с.
2. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – К.: Наукова думка, 1978. – 232 с.
3. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести: Справочное пособие. – К.: Наукова думка, 1981. – 496 с.
4. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
5. Бреславський Д.В. Рівняння стану повзучості металевих матеріалів за умов швидкого циклічного навантаження // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 1998. – Том 3, ч. 1. – С. 32-38.
6. Ясній П.В., Галушак М.П., Федак С.І. Вплив амплітуди циклічного навантажування на динамічну повзучість алюмінієвого сплаву // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. – Львів: Каменярь, 1999. – Вип.2. – Том 1. – С. 268 – 272.
7. Estrin Y. Constitutive modelling of creep of metallic materials: Some simple recipes // Materials Science and Engineering. - 2007. - Vol. 463. - P. 171-176.
8. Yong Li, Terence G. Langdon. An examination of creep data for an Al-Mg composite // Metallurgical and Materials Transactions. – 1997. - Vol. 28A. - P. 1271-1273.
9. Steven L. Atkins, Jeffery C. Gibeling. A finite element model of the effects of primary creep in an Al-SiC metal matrix composite // Metallurgical and Materials Transactions. - 1995. - Vol. 26 – P. 3067-3079.
10. Ясній П.В., Гладько В.Б. Оцінка локальної деформації сплаву АМг6 за переміщенням розтрісканих включень // Проблеми прочності. – 2003. - № 2. - С. 124-134.
11. Ясній П.В., Гладько В.Б., Пиндус Ю.І., Шульган І.В. Моделювання структурної неоднорідності конструкційних матеріалів методом скінчених елементів // Матеріали XI наукової конференції ТДТУ. – Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. – Тернопіль. – 2007. – С.116.
12. Ясній П.В., Федак С.І., Гладько В.Б., Галушак М.П. Сtribкоподібна деформація сплаву АМг6 при розтязі // Проблеми прочності. – 2004. - №2. – С. 5-12.
13. Ясній П.В., Галушак М.П., Федак С.І., Подкозьін В.Ю. Циклічна повзучість сплаву АМг6 // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2000. - №1. – С. 43-46.
14. Ясній П.В., Шульган І.В., Гладько В.Б., Пиндус Ю.І. Врахування структурної неоднорідності матеріалів при моделюванні методом скінчених елементів // Сьомий україно-польський науковий симпозіум "Актуальні задачі механіки неоднорідних структур". - Львів. - 2007. - С. 43-44.

Одержано 24.03.2008 р.